

# Технология и техника геологоразведочных работ

УДК 624.131

## ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ПРОЧНОСТИ

Л.А. Строкова, Е.Г. Шигорина

Томский политехнический университет

E-mail: geyer@tpu.ru

*На образцах горных пород из местечка Кютай Северного Тироля при одноосном и трехосном сжатии оценены прочностные и упругие параметры (сопротивление пород сдвигу при различных боковых давлениях, угол внутреннего трения и сцепления, модуль Юнга и коэффициенты Пуассона), а также изменение этих параметров в зависимости от ориентировки образцов к слоистости. Испытания сопровождались определением влажности, плотности и структурно-текстурных особенностей под поляризационным микроскопом. Установлено, что параметры механических свойств горных пород, определенные вдоль и поперек слоистости, отличаются друг от друга в зависимости от строения пород и особенно сил связей между зернами. Модуль Юнга больше параллельно слоистости, а предел прочности на сжатие, сцепление – нормально к слоистости.*

### **Ключевые слова:**

*Анизотропия, горные породы, лабораторные испытания, механические свойства.*

### **Key words:**

*Anisotropy, rocks, laboratory tests, mechanical properties.*

В современном представлении структура горных пород определяет важнейшие их качества, которые отражают условия их формирования и определяют физические, механические и другие свойства. Большой вклад в исследование структур горных пород внесли А. Казагранде, М.М. Филатов, В.В. Охотин, И.В. Попов, Е.М. Сергеев, А.К. Ларионов, В.Н. Соколов, Дж. Митчелл, А.Н. Заварицкий, П.И. Фадеев и многие другие. Без учета структурных особенностей невозможно объективно рассматривать вопросы формирования и природные прочностных и деформационных свойств различных типов горных пород.

Эмпирическим фундаментом представления о напряженно-деформированном состоянии грунтового массива, являющимся отражением его строения, истории геологического развития является наблюдение и анализ различных признаков анизотропного состояния земной коры. Существуют две физические причины, вызывающие анизотропное состояние грунтового массива. Первая – геометрическая анизотропия – анизотропия самой среды, обусловленная структурой ее конститuentов (атомов, молекул, зерен, трещин, слоев и т. д.), имеющая сравнительно большое число рангов. Вторая – физическая анизотропия, под которой понимается

неодинаковость свойств среды свойств по различным направлениям внутри этой среды [1].

Многие исследователи предлагают различать также анизотропию первичную (присущую, *inherent*), обусловленную природным строением грунта, и вторичную (наведенную, *induced*), связанную с переориентацией частиц (агрегатов) грунта в процессе развития в нем напряженно-деформированного состояния от внешних нагрузок. Поскольку первичная (природная) анизотропия находится в соответствии с природными напряжениями, возникающими в процессе формирования грунтового массива, то превышение этих напряжений в опыте приводит к реорганизации текстуры грунта. В этом случае, как считает Г. Гудеус [2], первичная текстура сохраняется частично и преобладают черты вторичной (наведенной) текстуры, которая в основном и определяет анизотропию грунтов деформируемых оснований. Для расчетов анизотропных грунтовых оснований важным является сам факт наличия анизотропии и ее количественная оценка, характеризующая суммарную (комбинированную) анизотропию.

Поведение анизотропного грунтового массива изучалось нами в связи с проектированием второй очереди гидроаккумулирующей электростанции

(ГАЭС) в населенном пункте Кютай (Австрия). Строительство ГАЭС «Кютай-1» проводилось в период 1977–1981 гг. С декабря 2006 г. начались инженерные изыскания под расширение существующей сети гидростанций Зелрайн-Зильц. Проектом предусматривается строительство каменно-земляной плотины с ядром из мореных суглинков высотой 120 м для создания водохранилища годичного регулирования стока, двух подземных гидроаккумулирующих электростанций Кютай-2 и Кютай-3, двух трубопроводов между новым водохранилищем и существующими водохранилищами Финстерталь и Лэнггенталь, а также туннельного водовода длиной 25,5 км диаметром 4,2 м для сбора воды с прилегающей территории Зулцталь-Оецталь и Штюбайталь площадью 61 км<sup>2</sup> [3].

Строительство ГАЭС «Кютай-2» проектной мощностью 180 МВт планируется на глубине 175 м внутри гранитного массива, т. е. снаружи будет заметен только портал штольни. Грунтовый материал из штолен ГАЭС и туннельного водовода будет использоваться для строительства дамбы. Ввод ее в эксплуатацию ожидается в 2017 г. Для возведения элементов плотины – упорной призмы, переходных слоев и обратных фильтров планируется использовать местные материалы. Планируемый объем насыпного грунта составляет 6,5 млн м<sup>3</sup>, из них объем ядра – 0,7 млн м<sup>3</sup>. Полезный объем водохранилища – 31 млн м<sup>3</sup>.

В ходе проведения буровых работ была установлена ярко выраженная анизотропия пород, связанная со слоистостью породообразующих минералов. Поэтому для изучения механических свойств потребовалось оценить значения продольных и поперечных деформаций образцов при приложении нагрузки параллельно, перпендикулярно и под углом 45° к слоистости. Для решения этой задачи было решено использовать металлофольговые тензорезисторы. Оценка механических свойств производилась в Центре Геотехники Технического университета Мюнхена (май–август 2008 г.) по стандартной методике трехосного сжатия в камере конструкции проф. Е. Ноек [4, 5]. Камера состоит из полого стального цилиндра с резьбой на обоих концах (рис. 1, 2). В камере имеются два боковых отверстия для нагнетания во внутреннюю полость масла и создания бокового давления  $\sigma_3$ . Кожух из полиуретана герметизирует внутреннюю полость камеры.

Для регистрации величины поперечных и продольных деформаций использовались четыре тензорезистора (рис. 3), наклеенные попарно на противоположных поверхностях образца. Дополнительно для измерения действующих вертикальных усилий и вертикальных перемещений прессы использовались датчик силы и потенциометрический датчик перемещений. Регистрация и запись шести измерений (2 продольных и 2 поперечных дефор-

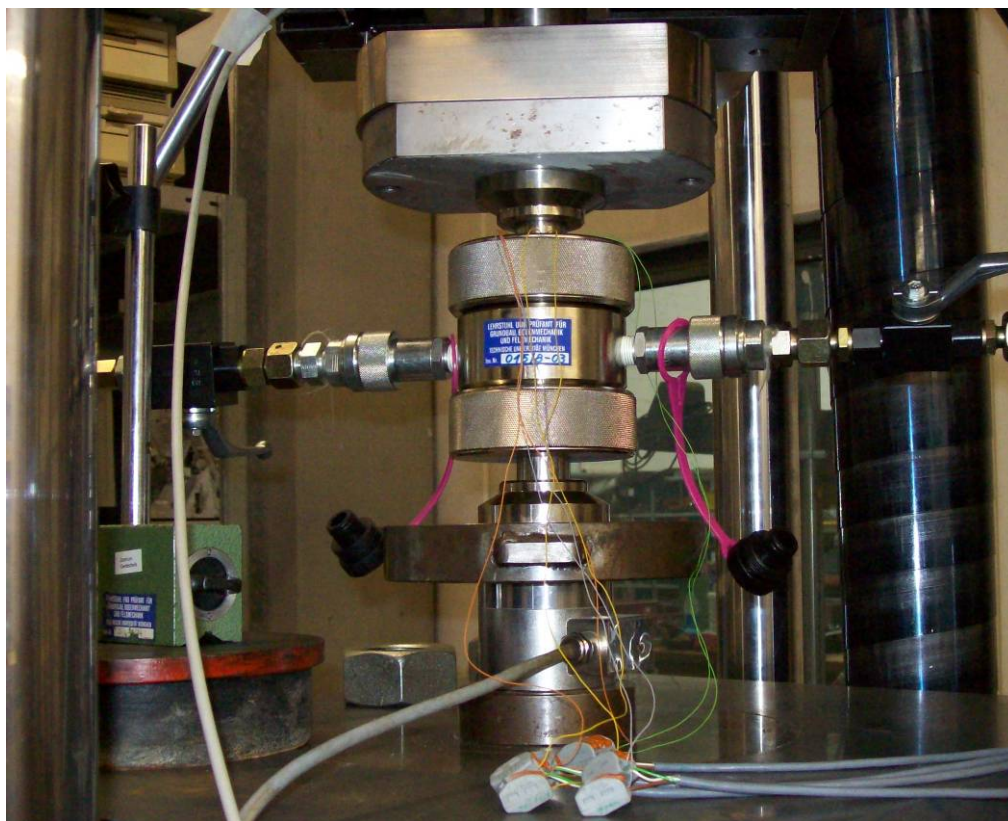
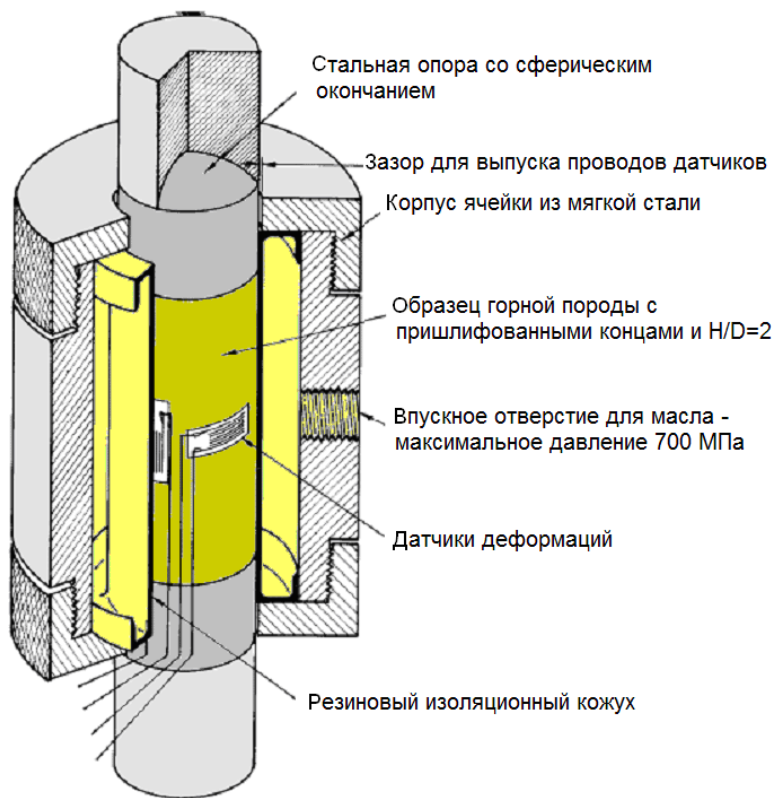
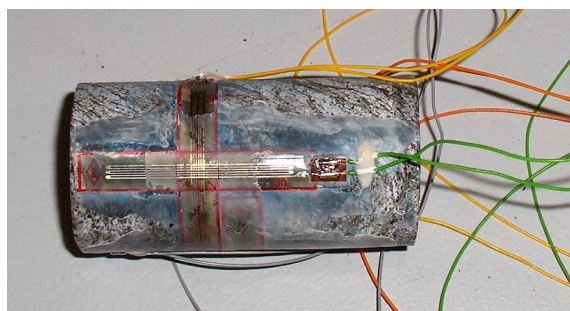


Рис. 1. Камера трехосного сжатия конструкции проф. Е. Ноек в Техническом университете Мюнхена (лето 2008)



**Рис. 2.** Частичный разрез камеры для трехосного испытания скальных пород – слева [5]; вид сверху и резиновый изоляционный кожух – фото справа

маций образца породы, вертикального давления на образец, перемещения пресса) проходила 4 раза в секунду и обеспечивалась программным комплексом «Catman easy».



**Рис. 3.** Образец ленточного гнейса (с ориентировкой 45° к слоистости) с наклеенными металлофольговыми тензорезисторами

Из керна было выбурено 7 серий образцов: 1 серия гранодиоритовых гнейсов со скрытой слоистостью и по 3 серии (с ориентировкой образцов: параллельно, перпендикулярно и под углом 45° к слоистости) для ленточных гнейсов и парагнейсов. В каждой серии было 9 образцов строго цилиндрической формы длиной ( $H$ ) 70 мм, диаметром ( $D$ ) 35 мм. После выбуривания образцов, выполнялись замеры высоты, диаметра, веса, наклеивались тензорезисторы. После установки образца в камеру

трехосного сжатия, датчики подключались к измерительному комплексу. Испытания проводились по схеме «консолидированный-дренированный сдвиг», т. е. вначале проводилось гидростатическое обжатие образца при давлениях 3, 6, 12 МН/м<sup>2</sup> для каждой тройки образцов, затем непрерывно с постоянной скоростью подавалась вертикальная нагрузка. Нагружение продолжалось от 40 мин до 2 ч до разрушения образца. После раздавливания образца породы делались фотографии, при возможности трехкратные замеры высоты, диаметра, определялась влажность [6].

**Таблица.** Усредненные характеристики упругих и прочностных свойств грунтов

Наименование горной породы	Ориентировка образца к слоистости	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Гранодиорит	Нет	18,8	63,7	50	0,30
Ленточный гнейс	Параллельно	32,2	59,6	55	0,13
	Нормально	15,6	61,9	50	0,23
	45°	22,1	45,8	60	0,30
Парагнейс	Параллельно	15,7	35,9	51	0,24
	Нормально	9,5	36,3	28	0,21
	45°	10,3	44,4	27	0,20



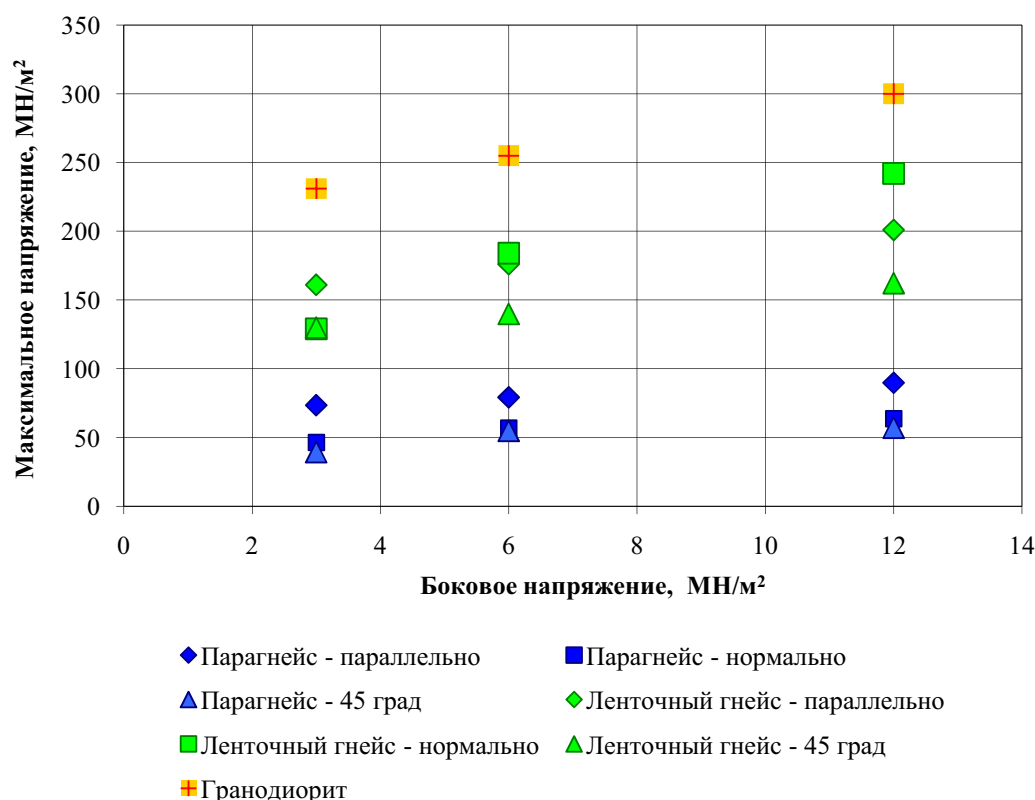


Рис. 4. Усредненные результаты трехосных испытаний образцов, ориентированных параллельно, нормально и под 45° к слоистости

Установлено, что параметры механических свойств горных пород, определенные вдоль и поперек слоистости, отличаются друг от друга в зависимости от строения пород и особенно сил связей между зернами. При этом модуль Юнга больше параллельно слоистости, а предел прочности на сжатие и сцепление — нормально к слоистости (табл., рис. 4).

Ярче проявляется анизотропия прочности пород по результатам трехосных испытаний. Наибольшей прочностью обладают гранодиориты, меньшей — ленточные гнейсы, минимальной — парагнейсы. Ориентировка образцов под 45° к слоистости имеет большее значение в анизотропии прочности, чем ориентировка образца параллельно или нормально слоистости.

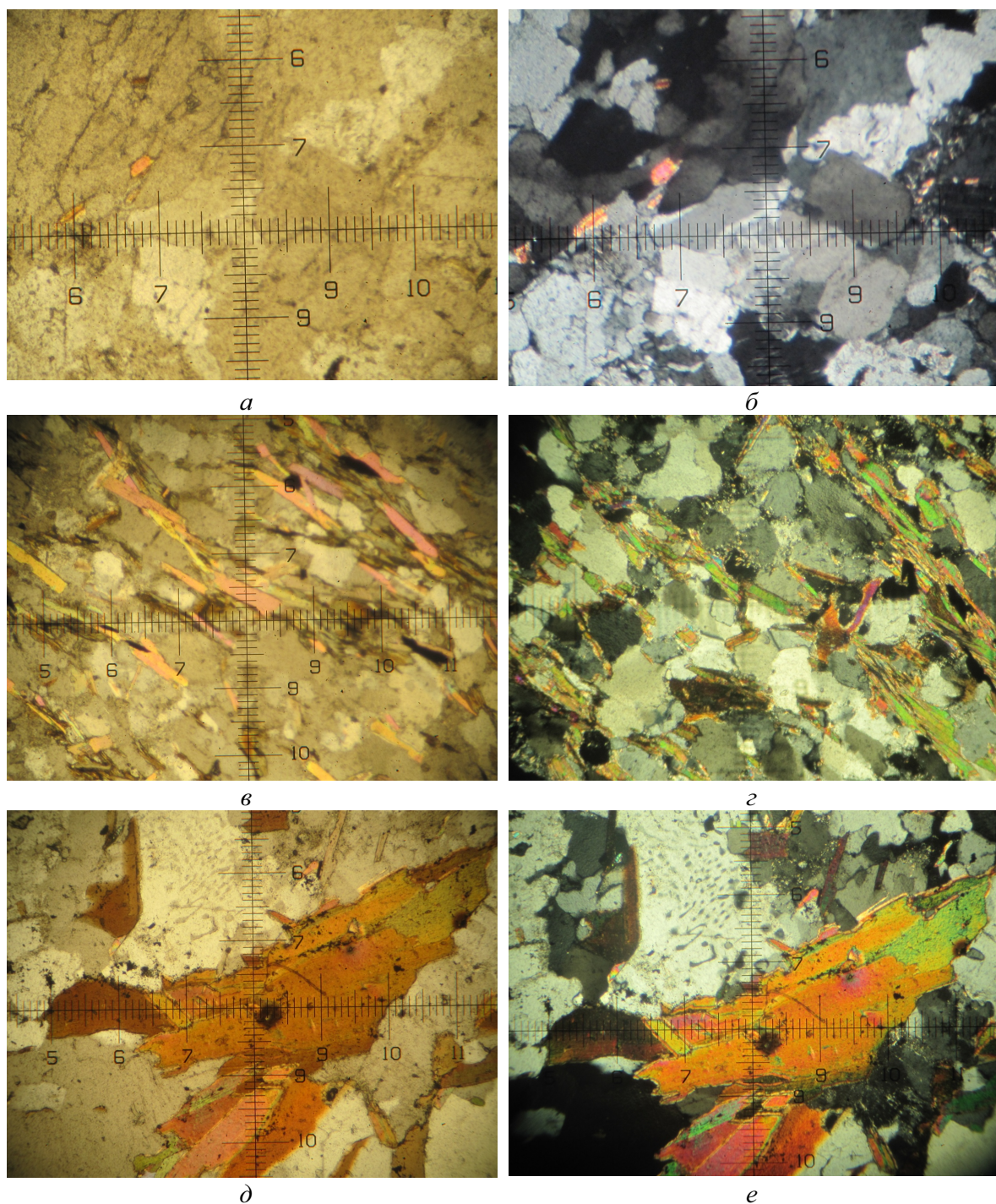
Для определения минералогического состава и структурно-текстурных особенностей пород (декабрь 2009 г., Томский политехнический университет) использовались образцы из каждой серии горных пород, выбуренных из керна, а также шлифы, соответствующие каждому из образцов. Таким образом, эти пробы исследовались на макро- и микроуровнях. Их характеристики:

- гранодиориты (рис. 5, а, б) — магматическая горная порода, состоит из кварца, роговой обманки, полевого шпата, среднего плагиоклаза, биотита, преобладают светло-окрашенные минералы; структура гипидиоморфнозернистая, гранитовая; плотность 2,72 г/см³, влажность 0,05 %, сопротивление одноосному сжатию 80 МН/м²;
- парагнейсы (рис. 5, в, г) — метаморфическая горная порода, образовавшаяся из осадочных

грунтов, характеризуется более или менее отчетливо выраженной параллельно-сланцеватой, часто тонкополосчатой текстурой с преобладающими гранобластовыми и порфиробластовыми структурами и состоящая из кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклазов, биотита, мусковита и роговой обманки, плотность 2,76 г/см³, влажность 0,03 %, сопротивление пород одноосному сжатию — 45...48 МН/м²;

- ленточные гнейсы (рис. 5, д, е) — по составу не отличаются от парагнейсов, разница лишь в том, что ленточные гнейсы образовались при метаморфизме магматических горных пород, это проявляется в характерной ленточной текстуре. Плотность пород 2,75 г/см³, влажность 0,04 %, сопротивление пород одноосному сжатию 93,2...120,7 МН/м² в зависимости от ориентировки образцов к слоистости.

Исследования показали, что породы обладают ярко выраженной анизотропией по упругим и прочностным свойствам. Параметры механических свойств в направлениях: перпендикулярно напластованию, параллельно напластованию и под углом 45° к слоистости различаются. Практическое значение полученных результатов состоит в возможности планирования проходки горных выработок с учетом структурной и физической анизотропии пород. Предвидение осложнений, связанных с прочностной анизотропностью массивов горных пород является одним из основных резервов надежности проектируемых сооружений.



**Рис. 5.** Шлифы гранодиоритов (а, б), парагнейсов (в, г) и ленточных гнейсов (д, е) под поляризационным микроскопом МП-201. На а, в, д: включен поляризатор, николи параллельны. На б, г, е: включен поляризатор и анализатор, николи скрещены. На масштабной сетке расстояние между цифрами 1 мм

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений. – СПб.: Недра, 1993. – 245 с.
2. Gudehus G. Finite elements in geomechanics. – London-Toronto, 1977. – 573 p.
3. Hofer B. Wasserkraftausbau in Tirol: Die Speicherkraftwerksprojekte der TIWAG // Zusammenfassung der Beiträge von der Informationsveranstaltung. – Innsbruck, 2006. – 116 p.
4. Hoek E., Franklin J.A. A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock // Trans. Instn Min. Metall. – 1968. – V. 77. – P. 22–26.
5. Hoek E. Rock Engineering. Course Notes by Evert Hoek. 2000. URL: [www.rocsience.com/hoek/references/Published-Papers.htm](http://www.rocsience.com/hoek/references/Published-Papers.htm) (дата обращения: 01.06.2010).
6. Строкова Л.А. Оценка механических свойств скальных пород при помощи трехосных испытаний // Инженерные изыскания. – 2008. – № 5. – С. 36–38.

Поступила 27.05.2010 г.